УДК 001.891.573+539.371

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СЕТЧАТЫХ ПЛАСТИН СО СЛОЖНОЙ ФОРМОЙ

[1*]***Нуралиев Ф.М.***, [2]***Султанов Б.Ж.***, [3]***Дауытова Ж.К.***

*nuraliev2001@mail.ru

[1]Ташкентский университет информационных технологий,
100202, Узбекистан, Ташкент, ул. Амира Темура, 108;
[2]Нукусский филиал Ташкентского университета информационных технологий,
230100, Узбекистан, Нукус, ул. А. Досназарова, 74;
[3]Казахский национальный университет имени аль-Фараби;
050040, Казахстан, Алматы, проспект Аль-Фараби, 71.

В данной статье рассматривается математическое моделирование процессов деформированного состояния сетчатых пластин со сложной конфигурацией области в плане. В частности, приводятся математическая модель процессов деформированного состояния сетчатых пластин, вычислительный алгоритм для расчета сетчатых пластин со сложной формой при комбинации методов R-функций В.Л.Рвачева (RFM) и Бубнова-Галеркина, структуры решений, построенные конструктивным методом RFM и результаты вычислительного эксперимента.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, сетчатые пластины, метод R-функций (RFM), метод Бубнова-Галеркина.

Цитирование: *Нуралиев Ф.М., Султанов Б.Ж., Дауытова Ж.К.* Математическое моделирование процессов деформированного состояния сетчатых пластин со сложной формой // Проблемы вычислительной и прикладной математики. – 2024. – № 2(56). – С. 30-40.

1 Введение

Конструкции в виде сетчатых оболочек и пластин встречаются как в строительной промышленности, так и в других областях техники. В связи с этим за последнее время в нашей республике и за рубежом резко возрос интерес к подобным конструкциям. Преимуществами, связанными с возведением конструкций, являются высокое индустриальное изготовление основных конструктивных элементов и значительное увеличение стенки их заведений готовности, объективность изделий и возможность их широких унификаций не только для отдельных сооружений но и для зданий с различными предметами, нагрузками и схемами операций. В разработку теории сетчатых систем внесли такие известные ученые, как Л.Н.Лубо, Б.А.Миронков, Г.И.Пшеничнов, В.К.Кабулов, Т.Ш.Ширинкулов, Т.Буриев, К.С.Абдурашитов и др. Однако во многих рассмотренных задачах инженерной практики по исследованию НДС сетчатых пластин их конфигурации имеют классические формы. Но инженерная практика ставит перед конструкторами и инженерами-проектировщиками выполнение расчетов в случаях, когда конфигурации сетчатых пластин имеют сложную форму.

С этой точки зрения разработка вычислительного алгоритма и создание соответственного программного обеспечения, а также на их базе выполнение расчетов сетчатых пластин со сложной конфигурацией весьма актуальны.

2 Математические модели

Уравнения равновесия элемента сетчатой пластины в декартовой системе координат относительно имеют вид [1–3]

$$\frac{\partial Q_1}{\partial x_1} + \frac{\partial Q_2}{\partial y} + Z = 0, \tag{1}$$

где

$$Q_1 = \frac{\partial H_2}{\partial y} - \frac{\partial M_1}{\partial x},\ Q_2 = \frac{\partial H_1}{\partial x} - \frac{\partial M_2}{\partial y}.$$

Здесь Z – внешняя нагрузка; параметры M_1, M_2 – изгибающие, а H_1, H_2 – крутящие моменты; Q_1, Q_2 – поперечные силы.

Изгибающие и крутящие моменты, когда число стержней равняется n (общий случай), определяются по следующим формулам:

$$\left.\begin{array}{l} M_1 = -(D_{11}\chi_1 + D_{12} * \chi_2 + 2D_{16} * \tau), \\ M_2 = -(D_{21}\chi_1 + D_{12} * \chi_2 + 2D_{16} * \tau), \\ H_1 = D_{61}*^{(i)}\chi_1 + D_{62}*^{(i)}\chi_2 + D_{66}*^{(i)},\ i = 1, 2, \end{array}\right\} \tag{2}$$

в которых

$$\left.\begin{array}{l} D^*_{11} = D_{11} + K_{11}, D^*_{12} = D_{12} - K_{12}, D^*_{16} = D_{16} - \frac{1}{2}K_{16}, \\ D^*_{21} = D_{k1} - K_{11}, D^*_{22} = D_{22} + K_{22}, D^*_{26} = D_{26} + \frac{1}{2}K_{26}, \\ D^{*(i)}_{16} = D_{61} + K^{(i)}_{61}, D^{*(i)}_{26} = D_{62} - K^{(i)}_{62}, \\ D^{*(i)}_{66} = D_{66} - K^{(i)}_{66}, i = 1, 2, \end{array}\right\} \tag{3}$$

$$\left.\begin{array}{l} D_{11} = \sum\limits_{i=1}^{n} I_i C_i^4, D_{12} = \sum\limits_{i=1}^{n} I_i S_i^2 C_i^2, D_{66} = 2D_{12} \\ D_{12} = \sum\limits_{i=1}^{n} I_i S_i C_i^3, D_{22} = \sum\limits_{i=1}^{n} I_i S_i^4, D_{26} = \sum\limits_{i=1}^{n} I_i S_i^3 C_i, D_{ij} = D_{ij}, \\ K^{(1)}_{61} = K^{(1)}_{62} = \sum\limits_{i=1}^{n} C_i S_i C_i^3, K^{(1)}_{66} = \sum\limits_{i=1}^{n} C_i c_i^2 \cos 2\varphi_i, \\ K^{(2)}_{61} = K^{(2)}_{62} = \sum\limits_{i=1}^{n} C_i S_i^2 C_i, K^{(2)}_{66} = \sum\limits_{i=1}^{n} C_i S_i^2 \cos 2\varphi_i, \\ K_i = E_i F_i / a_i, I = F_i J_{1i}/a_i, C_i = G_i J_{3i/a_i}. \end{array}\right\} \tag{4}$$

Дадим характеристику параметров, приведенных в (4). I_i, C_i представляют собой отношения соответствующих жесткостных характеристик стержней у расстоянию между их осями; a_i – расстояние между осями соседних стержней; F_i – площадь стержня; J_{1i}, J_{3i} – главные, центральные моменты инерции; n – число семейств стержней сетки; φ_i – угол между осью α и осью стержня (отсчитывается от оси α в направлении оси β); $S_i = \sin\varphi_i, C_i = \cos\varphi_i$,

$$x_1 = -\frac{\partial^2 W}{\partial x^2},\ x_1 = -\frac{\partial^2 W}{\partial x^2},\ \tau = -\frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y}.$$

Подставляя (2) с учетом (3) в (1), получим уравнение равновесия сетчатых пластин относительно прогиба – W:

$$\begin{gathered}(D_{11}+K_{11})\frac{\partial^2 W}{\partial x^2}+2(D_{61}+D_{16})\frac{\partial^4 W}{\partial x^3\partial y}+\\ +(3D_{66}+K_{16})\frac{\partial^4 W}{\partial x^2\partial y^2}+2(2D_{62}+K_{16})\frac{\partial^4 W}{\partial x\partial y^3}+\\ +(D_{22}+K_{11})\frac{\partial^4 W}{\partial y^4}+\left[2\frac{\partial}{\partial x}(D_{11}+K_{11})\frac{\partial}{\partial y}(2D_{61}-K_{16})\right]\frac{\partial^3 W}{\partial x^3}+\\ +\left[3\frac{\partial}{\partial x}(2D_{61}-K_{16})+\frac{\partial}{\partial y}(3D_{66}-K_1^0\right],\\ \frac{\partial^3 W}{\partial x^3\partial y}+\frac{\partial}{\partial x}(3D_{66}+K_1^0)+3\frac{\partial}{\partial y}(2D_{62}+K_{16})\frac{\partial^3 W}{\partial x\partial y^2}+\\ +\left[\frac{\partial}{\partial x}(2D_{62}+K_{16})+2\frac{\partial}{\partial y}(D_{22}+K_{11})\right]\frac{\partial^3 W}{\partial y^3}+\\ +\left[+\frac{\partial}{\partial x\partial y}(2D_{66}+K_1^0)+\frac{\partial}{\partial y^2}(2D_{62}+K_{16})\right]\frac{\partial^2 W}{\partial y\partial x}+\\ +\left[\frac{\partial^2}{\partial x^2}(D_{11}+K_{11})\frac{\partial}{\partial x\partial y}(2D_{61}-K_{16})\frac{\partial}{\partial y^2}(2D_{61}+K_{16})\right.\\ \left.+\frac{\partial^2}{\partial x^2}(D_{12}-K_{11})+\frac{\partial^2}{\partial x\partial y}(2D_{62}+K_{16})+\frac{\partial}{\partial y^2}(D_{22}+K_{11})\right]\frac{\partial^2 W}{\partial y^2}-Z=0,\end{gathered}\tag{5}$$

где

$$K_1^{(0)}=\sum_{i=1}^{h}(1-6j_i^2c_i^2)c_i,\ K_2^{(0)}=\sum_{i=1}^{h}C_i\cos^2 2\varphi_i.\tag{6}$$

Подставляя (4) в (3), затем полученные соотношения в (2), имеем:

$$\left.\begin{aligned}M_1&=\sum_{i=1}^{4}c_i\nabla_i(I_ic_i\nabla_i+C_is_i\nabla_i)w,\\ M_2&=\sum_{i=1}^{4}s_i\nabla_i(I_is_i\nabla_i+C_ic_i\nabla_i)w,\\ H_1&=-\sum_{i=1}^{4}c_i\nabla_i(I_ic_i\nabla_i-C_ic_i\nabla_i)w,\\ H_2&=-\sum_{i=1}^{4}s_i\nabla_i(I_ic_i\nabla_i-C_ic_i\nabla_i)w.\end{aligned}\right\}\tag{7}$$

$$\left.\begin{aligned}Q_1&=-\sum_{i=1}^{4}\nabla_i^2(I_ic_i\nabla_i+C_is_i\Delta_i)w,\\ Q_1&=-\sum_{i=1}^{4}\nabla_i^2(I_is_i\nabla_i+C_ic_i\Delta_i)w,\end{aligned}\right\}\tag{8}$$

В силу (7) уравнение (5) принимает вид

$$\sum_{i=1}^{4}\nabla_i^2(I_i\nabla_i^2+C_iS_i^2)w-z=0.\tag{9}$$

Уравнение (5) решается при условии

$$M_n\delta\left.\frac{\partial W}{\partial n}\right|=0, R_n\delta W|_G=0,\tag{10}$$

где n – направление внешней нормали; (δ – знак операции вариации; M_n – нормальный изгибающий момент,

$$M_n = M_1 \cos^2\alpha + (H_1 + H_2)\cos\alpha\sin\alpha + M_2 \sin 2\alpha, \tag{11}$$

R_n – нормальная реакция опоры, имеющая вид

$$\begin{gathered} R_n = Q_n + \frac{\partial M_n \tau}{\partial S}, \\ Q_n = Q_1 \cos\alpha + Q_2 \sin\alpha, \\ M_n = H_1(\cos^2\alpha - \sin^2\alpha) + (M_2 - M_1)\cos\alpha\sin\alpha = \\ = H_1 \cos 2\alpha + \frac{1}{2}(M_2 - M_1)\sin 2\alpha, \end{gathered} \tag{12}$$

здесь (α – угол между внешней нормалью и осью x; W – прогиб пластины; W – прогиб пластины; S – длина дуги для границы Γ области пластины.

3 Вычислительный алгоритм

В этом разделе приводится вычислительный алгоритм построения совместной комбинации методов R – функций В.Л.Рвачева [4, 5] и Бубнова Галеркина для расчета сетчатых пластин со сложной формой, который состоит из следующих этапов [6–10]:

- построение координатных последовательностей (структур решений);
- построение разрешающих уравнений (дискретизации по пространственным переменным) на базе метода Бубнова-Галеркина;
- приближенные вычисления значений двукратных интегралов;
- решение разрешающих уравнений;
- вычисление значений искомых параметров;
- оформление результатов расчетов.

Дифференциальные уравнения (1.3.5) равновесия сетчатой пластины в зависимости от чисел семейств стержней решаются при соответствующих краевых условиях, зависящих от способов закрепления ее краев. Эти краевые условия в обобщенном виде определяются по условию (10).

В общем виде координатные последовательности, соответствующие условию (5), представим в виде

$$W = \sum_{i=1}^{n} C_i \varphi_i, \tag{13}$$

где C_i – неизвестные коэффициенты, подлежащие определению; φ_i – базисная система координатных функций, удовлетворяющих краевым условиям, которая построенная при помощи метода R – функций В.Л.Рвачева.

Подставим (13) в (5), и выполняя процедуры Бубнова Галеркина, получим следующую систему алгебраических уравнений;

$$AC = f, \tag{14}$$

где

$$\begin{gathered} A = \{a_{ij}\},\ \dim(A) = n \times n, \\ C = \{c_i\},\ f = \{f_i\},\ \dim(C) = n \times 1,\ \dim(f) = n \times 1, \end{gathered}$$

Здесь в общем случае элементы a_{ij} и f_i для уравнений (5) имеет вид

$$a_{ij} = \int\int\limits_{\Omega} \tilde{A} W_i W_j d\Omega, \tag{15}$$

$$f_j = \int\int\limits_{\Omega} Z W_j d\Omega. \tag{16}$$

Здесь

$$\begin{gathered}
\tilde{A}W_i := (D_{11} + K_{11})\frac{\partial^2 W_i}{\partial x^2} + 2(D_{61} + D_{16})\frac{\partial^4 W_i}{\partial x^3 \partial y} + \\
+(3D_{66} + K_{16})\frac{\partial^4 W_i}{\partial x^2 \partial y^2} + 2(2D_{62} + K_{16})\frac{\partial^4 W_i}{\partial x \partial y^3} + \\
+(D_{22} + K_{11})\frac{\partial^4 W_i}{\partial y^4} + \left[2\frac{\partial}{\partial x}(D_{11} + K_{11})\frac{\partial}{\partial y}(2D_{61} - K_{16})\right]\frac{\partial^3 W_i}{\partial x^3} + \\
+\left[3\frac{\partial}{\partial x}(2D_{61} - K_{16}) + \frac{\partial}{\partial y}(3D_{66} - K_1^0\right] \\
\frac{\partial^3 W_i}{\partial x^3 \partial y} + \frac{\partial}{\partial x}(3D_{66} + K_1^0) + 3\frac{\partial}{\partial y}(2D_{62} + K_{16})\frac{\partial^3 W_i}{\partial x \partial y^2} + \\
+\left[\frac{\partial}{\partial x}(2D_{62} + K_{16}) + 2\frac{\partial}{\partial y}(D_{22} + K_{11})\right]\frac{\partial^3 W_i}{\partial y^3} + \\
+\left[\frac{\partial^2}{\partial x^2}(D_{11} + K_{11})\frac{\partial}{\partial x \partial y}(2D_{61} - K_{16})\frac{\partial}{\partial y^2}(2D_{61} + K_{16}) + \right. \\
\left. +\frac{\partial}{\partial x \partial y}(2D_{66} + K_1^0) + \frac{\partial}{\partial y^2}(2D_{62} + K_{16})\right]\frac{\partial^2 W_i}{\partial y \partial x} + \\
+\left[\frac{\partial^2}{\partial x^2}(D_{12} - K_{11}) + \frac{\partial^2}{\partial x \partial y}(2D_{62} + K_{16}) + \frac{\partial}{\partial y^2}(D_{22} + K_{11})\right]\frac{\partial^2 W_i}{\partial y^2}.
\end{gathered} \tag{17}$$

Если рассмотреть частные случая уравнений (5) то (14) и (15) соответственно принимают вид

$$a_{ij} = \int\int\limits_{\Omega} (D_1 \frac{\partial^4 W_i}{\partial x^4} + D_3 \frac{\partial^4 W_i}{\partial x^2 \partial y^2} + D_2 \frac{\partial^4 W_i}{\partial y^4})_i W_j d\Omega, \tag{18}$$

$$f_j = \int\int\limits_{\Omega} a W_j d\Omega. \tag{19}$$

Здесь a в зависимости от рассмотрения уравнений (15) или частные случаи соответственно принимает следующие значения:

$$a := \frac{Z}{I};\ a := \frac{a_3}{EJ_1}Z;\ a := \frac{a_4}{EJ_1}Z.$$

В данном случае выражения для a_{ij} в уравнениях (15) или другие по форме аналогичны выражениям (18), разница в том, что здесь выражения D_1, D_2, D_3 будут разными.

Уравнение (16) решается методом исключения Гаусса. Определяются неизвестные коэффициенты C_i. Затем подставляя значения C_i в (13), находим значение W. Далее по структурным формулам определяются значения изгибающих и крутящих моментов в также поперечных сил пластины. Далее по известным значениям изгибающих (M_1, M_2) и крутящих (M_{12}) моментов и поперечных сил Q_1, Q_2; вычисляются значения усилий (N_i^*, S_i^*) и моментов M_i^* стержня.

Отметим, что значение двукратных интегралов вычисляется по точной формуле Гаусса.

Теперь рассмотрим собственно построение структурных формул. Для этой цели используются структурные формулы для анизотропных пластин лишь с той разницей, когда коэффициент D_{ij} заменяется на D_{ij}^* в случае сетчатых пластин.

Отметим, что когда края пластины жестко защемлены, то структура решения имеет вид [4, 5]:

$$W = \omega^2 \Phi. \tag{20}$$

Теперь рассмотрим свободно-опертое краевое условие. В этом случае структура решения имеет вид

$$W(x) = \omega\Phi_1 - \frac{\omega^2}{2(A_1 - \omega)}\left(A_1(2D_1\Phi_1 + \Phi_1 D_2\omega) + 2A_2T_1\Phi_1 - \frac{1}{\rho}A_3\Phi_1\right) + \omega^3\Phi_2. \tag{21}$$

Рассмотрим смещенное краевое условие. Пусть например, когда Γ_1 – участок Γ_1 – жестко защемленная пластина, а остальная часть $\Gamma_2 = -\Gamma_1$ свободна, то структура решения согласно [4, 5] имеет вид

$$\begin{gathered} W = \omega_1^2\Phi_1 + \frac{\omega_1^2\omega_2^2}{2(\omega_1^2+\omega_2^2)}\left\{\omega_2^2\Phi_2 - \right. \\ \left. - \left\{\frac{\omega_2}{3}\left\{\left(S_1^{*(2)}\left[1 - \frac{\omega_2^2}{2S_1^*}0B_2^{*(2)}\right] + B_3^{*(2)} - \frac{2A_6^*}{S_1^*}KB_2^{*(2)}\right)\right\} - \frac{1}{S_2}B_2^{*(2)}\right\}(W_1^2\Phi_1)\right\}. \end{gathered} \tag{22}$$

Здесь Φ_1, Φ_2 – неопределенные компоненты структурных формул, которые обычно представляются в виде [4, 5]:

$$\Phi_s = \sum_{i=1}^{m_s} C_{is}\psi_i^s, \;\; s = 1, 2, \tag{23}$$

где $\{\psi_i^s\}$ – выбранная последовательность полиномов, таких как степенной полином, полином Чебышева, тригонометрический полином и т.д; ω_1, ω_2 – соответственно нормализованные уравнения границ Γ_1 и Γ_2 области Γ_2 и Γ_2.

4 Вычислительный эксперимент

Этот раздел посвящен расчету сетчатых пластин ромбоидальной структуры. При этом конфигурации пластин считаются со сложной формой [7–10].

Рассмотрим пластины шестиугольной формы (рис. 1) и при расчете этой пластины считаем, что ее края жестко - защемленным свободно опертым.

Задача сводится к интегрирование уравнение (15), т.е.

$$D_1\frac{\partial^4 W}{\partial x^4} + D_3\frac{\partial^4 W}{\partial x^2 \partial y^2} + D_2\frac{\partial^4 W}{\partial y^4} = \frac{z}{I} \tag{24}$$

при условии

$$W\,|_\Gamma = 0, \quad M_4\,|_\Gamma = 0. \tag{25}$$

Уравнение геометрии области в данном случае имеет вид:

$$\omega = \omega_1 \wedge \omega_2 \wedge_0 \omega_3. \tag{26}$$

$$\omega_1 = \left(\frac{3}{4} - y^2\right)/\sqrt{3}, \omega_2 = f_1 \wedge_0 f_3, \omega_3 = f_4 \wedge_0 f_5, f_1 =$$
$$= \left(\sqrt{3} - \sqrt{3}x - y\right)/2, f_3 = \left(\sqrt{3} + \sqrt{3}x - y\right)\sqrt{2},$$
$$f_4 = \frac{\sqrt{3}}{2}\left(\sqrt{3} + \sqrt{3}x + y\right)/2, f_5 = \left(\sqrt{3} - \sqrt{3}x + y\right)/2.$$

Рис. 1

Отметим, что выражения здесь для моментов по форме точно не соответствуют для формул изгибающих моментов для обычных ортотропных упругих пластин. Поэтому для построения структурных формул для выражения моментов сетчатых пластин приведем стандартному виду.

Для этой цели рассмотрим соотношение:

$$\begin{gathered} M_1 = 2c^2\left[(Ic^2 + Cs^2)\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + (I - C)s^2\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\right], \\ M_2 = 2s^2\left[(I - C)c^2\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + (Is^2 + Cc^2)\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\right], \\ H_1 = -2c^2\left(2Is^2 + C\cos 2\varphi\right)\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}, \\ H_2 = 2s^2\left(C\cos 2\varphi - 2Ic^2\right)\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}. \end{gathered} \tag{27}$$

Перепишем соотношение (27) в виде

$$M_1 = D_{1c}\left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + v_{2c}\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\right],$$

$$M_2 = D_{2c}\left[\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + v_{1c}\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\right], \tag{28}$$

$$H_1 = \alpha_1\frac{\partial^2 w}{\partial x\partial y},$$

$$H_2 = \alpha_2\frac{\partial^2 w}{\partial x\partial y},$$

где

$$D_{1c} = 2c^2(Ic^2 + Cs^2),\ v_{2c} = \frac{(I-C)s^2}{Ic^2 + Cs^2},$$

$$D_{2c} = 2s^2(Is^2 + Cc^2),\ v_{1c} = \frac{(I-C)c^2}{Is^2 + Cc^2},$$

$$C = GJ_3/a,\ I = EJ_1/a,$$

$$C = \cos\varphi,\ \ S = \sin\varphi,$$

$$\alpha_1 = -2c^2\left(2Is^2 + C\cos 2\varphi\right)\frac{\partial^2 w}{\partial x\partial y},$$

$$\alpha_2 = 2s^2\left(C\cos 2\varphi - 2Ic^2\right)\frac{\partial^2 w}{\partial x\partial y}.$$

Ромбоидальной структуры пластин $\varphi = \frac{\pi}{4}$. Поэтому $s = c$ и $D_{1c} = D_{2c}$; $v_{1c} = v_{2c}$, следовательно, считаем и $J_3 = 0$ эти формулы сможем переписать в виде

$$M_1 = D_c\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + v_c\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\right),$$

$$M_2 = D_c\left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + v_c\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\right), \tag{29}$$

$$H_1 = H_2 = -4Ic^2s^2,$$

где $D_C = D_C = D_{2C},\ v_c = v_{1c} = v_{2c}$.

Согласно (29) имеем следующее соотношение

$$M_n = D_c\left(\frac{\partial^2 w}{\partial n^2} + v_c\frac{\partial^2 w}{\partial \tau^2}\right), \tag{30}$$

так как $M_n = M_1\cos^2\alpha + M_2\sin^2\alpha + 2M_{12}\sin\alpha\cos\alpha$. Здесь n – внешняя нормаль, τ– касательная.

Исходя из вышесказанных замечаний краевое условие свободно-опертой пластины с ромбоидальной структуры определяется соотношениям вида

$$W\,|_r = 0,\ \left(\frac{\partial^2 w}{\partial n^2} + v_c\frac{\partial^2 w}{\partial \tau^2}\right)\Bigg|_{\ r} = 0. \tag{31}$$

Поэтому структура решения данного краевого условия в данном случае представляется виде

$$W = \omega - \frac{\bar{\omega}^2}{2}[(D_2\bar{\omega} + \upsilon_c T_2\bar{\omega}) + 2D_1]. \tag{32}$$

Отметим, что если не будет учтена жесткость стержней, т.е. $J_3 = 0$, тогда $C = 0$, $\nu_c = 1$ и (3.2.7) принимает вид

$$W = \omega - \frac{\bar{\omega}^2}{2}[(D_2\bar{\omega} + T_2\bar{\omega}) + 2D_1]. \tag{33}$$

Теперь рассмотрим шестиугольную пластину ромбической структуры изображенной на рис. 2, на котором приведены числовые и графические результаты по одному из сечений 1.

x	W n=3 c=20
-1	0
-0,9	0,00010152
-0,8	0,00071714
-0,7	0,00205652
-0,6	0,00400341
-0,5	0,00626503
-0,4	0,00851907
-0,3	0,01049807
-0,2	0,01201645
-0,1	0,01296362
0	0,01328472
0,1	0,01296362
0,2	0,01201645
0,3	0,01049807
0,4	0,00851907
0,5	0,00626503
0,6	0,00400341
0,7	0,00205652
0,8	0,00071714
0,9	0,00010152
1	0

Пусть граница изображения на рис. 2 ромбоидальная сетчатая пластинки будет жестко защемленной. Тогда структура решения данной задачи имеет вид:

$$W = \omega^2\Phi.$$

Здесь ω определяется формулой (26) и Φ представляется в виде (23).

5 Заключение

Разработан вычислительный алгоритм для расчета сетчатых пластин со сложной формой при комбинации методов R – функций В.Л.Рвачева и Бубнова-Галеркина.

Литература

[1] *Пшеничнов Г.И.* Теория тонких упругих сетчатых оболочек и пластин. – М.: Наука, 1982. – 352 с.

[2] *Пшеничнов Г.И.* Расчет сетчатых оболочек // Исследования по теории сооружений. – 1976. – Вып. 22.

[3] *Пшеничнов Г.И.* Теория тонких упругих сетчатых оболочек: дис. докт. техн. наук. – М., 1968.

[4] *Рвачев В.Л.* Теории R-Функции и их некоторые предложения. – Киев: Наукова думка, 1982. – 552 с.

[5] *Рвачев В.Л., Курпа Л.* Метод R – функций в задачах изгиба пластин со сложной формой. – Киев: Наукова думка, 1988.

[6] *Nuraliev F. et al.* Calculation Results of the Task of Geometric Nonlinear Deformation of Electro-magneto-elastic Thin Plates in a Complex Configuration // International Conference on Information Science and Communications Technologies (ICISCT 2022). – 2022.

[7] *Nuraliev F., Safarov S., Artikbayev M.* Solving the problem of geometrical nonlinear deformation of electro-magnetic thin plate with complex configuration and analysis of results // International Conference on Information Science and Communications Technologies: Applications, Trends and Opportunities (ICISCT 2021). – 2021.

[8] *Нуралиев Ф.М. и др.* Математическое моделирование геометрических нелинейных процессов электромагнитных упругих тонких пластин сложной конфигурации // Проблемы вычислительной и прикладной математики. – 2022. – № 1. – С. 90-109.

[9] *Nuraliev F.M.* Algorithmization in Magneto-elasticity of Thin Plates and Shells of the Complex Configurations // Computer Science and Information Technology. – 2015. – Vol. 3. – P. 66-69.

[10] *Султонов Б.* Обоснование достоверности численных результатов приближенного решения расчету сетчатых пластин // Совместный выпуск Узбекского журнала «Проблемы информатики и энергетики» и сборника научных трудов «Вопросы вычислительной и прикладной математики» : по материалам Республиканской научно-технической конференции «Современное состояние и пути развития информационных технологий». – Ташкент, 2008. – С. 226-229.

Поступила в редакцию 13.04.2024

UDC 001.891.573+539.371

MATHEMATICAL MODELING OF THE DEFORMED STATE PROCESSES OF MESH PLATES WITH A COMPLEX SHAPE

[1*]***Nuraliev F.M.***, [2]***Sultanov B.J.***, [3]***Dauytova J.K.***

*nuraliev2001@mail.ru

[1]Tashkent University of Information Technologies,
108, Amir Temur str., Tashkent, 100200 Uzbekistan;
[2]The Nukus branch of the Tashkent University of Information Technologies,
74, Allayar Dosnazarov str., Nukus, 230100 Uzbekistan;
[3]Al-Farabi Kazakh National University,
71, Al-Farabi Aveju, Almaty, 050040 Kazakhstan.

This article discusses the mathematical modeling of the processes of the deformed state of mesh plates with a complex configuration of the area in the plan. In particular, a mathematical model of the deformed state processes of mesh plates, a computational algorithm for calculating mesh plates with a complex shape using a combination of R-function

by V.L.Rvachev (RFM) and Bubnov-Galerkin methods, solution structures constructed using the RFM constructive method and the results of a computational experiment are presented.

Keywords: stress-strain state, mesh plates, R-function method (RFM), Bubnov-Galerkin method.

Citation: Nuraliev F.M., Sultanov B.J., Dauytova J.K. 2024. Mathematical modeling of the deformed state processes of mesh plates with a complex shape. *Problems of Computational and Applied Mathematics.* 2(56): 30-40.

№ 2(56) 2024

ISSN 2181-8460

HISOBLASH VA AMALIY MATEMATIKA MUAMMOLARI

ПРОБЛЕМЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ И ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ

PROBLEMS OF COMPUTATIONAL AND APPLIED MATHEMATICS

RAQAMLI TEXNOLOGIYALAR VA
SUN'IY INTELLEKTNI RIVOJLANTIRISH
ILMIY-TADQIQOT INSTITUTI

ПРОБЛЕМЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ И ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ

№ 2(56) 2024

Журнал основан в 2015 году.
Издается 6 раз в год.

Учредитель:
Научно-исследовательский институт развития цифровых технологий и искусственного интеллекта.

Главный редактор:
Равшанов Н.

Заместители главного редактора:
Азамов А.А., Арипов М.М., Шадиметов Х.М.

Ответственный секретарь:
Ахмедов Д.Д.

Редакционный совет:
Азамова Н.А., Алоев Р.Д., Амиргалиев Е.Н. (Казахстан), Бурнашев В.Ф., Загребина С.А. (Россия), Задорин А.И. (Россия), Игнатьев Н.А., Ильин В.П. (Россия), Исмагилов И.И. (Россия), Кабанихин С.И. (Россия), Карачик В.В. (Россия), Курбонов Н.М., Маматов Н.С., Мирзаев Н.М., Мирзаева Г.Р., Мухамадиев А.Ш., Назирова Э.Ш., Нормуродов Ч.Б., Нуралиев Ф.М., Опанасенко В.Н. (Украина), Расулмухамедов М.М., Расулов А.С., Садуллаева Ш.А., Старовойтов В.В. (Беларусь), Хаётов А.Р., Халджигитов А., Хамдамов Р.Х., Хужаев И.К., Хужаеров Б.Х., Чье Ен Ун (Россия), Шабозов М.Ш. (Таджикистан), Dimov I. (Болгария), Li Y. (США), Mascagni M. (США), Min A. (Германия), Schaumburg H. (Германия), Singh D. (Южная Корея), Singh M. (Южная Корея).

Журнал зарегистрирован в Агентстве информации и массовых коммуникаций при Администрации Президента Республики Узбекистан.
Регистрационное свидетельство №0856 от 5 августа 2015 года.

ISSN 2181-8460, eISSN 2181-046X

При перепечатке материалов ссылка на журнал обязательна.
За точность фактов и достоверность информации ответственность несут авторы.

Адрес редакции:
100125, г. Ташкент, м-в. Буз-2, 17А.
Тел.: +(99871) 263-41-98.
E-mail: journals@airi.uz.
Сайт: www.pvpm.uz.

Дизайн и компьютерная вёрстка:
Шарипов Х.Д.

Отпечатано в типографии НИИ РЦТИИ.
Подписано в печать 30.04.2024 г.
Формат 60x84 1/8. Заказ №2. Тираж 100 экз.

Содержание

Алимов Х.Т., Паровик Р.И.
Некоторые аспекты численного анализа дробной математической модели Макшерри для описания искусственной ЭКГ 7

Халджигитов А.А., Адамбаев У.Э., Джумаёзов У.З., Хасанова З.З.
Новые модельные уравнения в деформациях для анизотропных тел 17

Нуралиев Ф.М., Султанов Б.Ж., Дауытова Ж.К.
Математическое моделирование процессов деформированного состояния сетчатых пластин со сложной формой 30

Равшанов Н., Таштемирова Н., Каршиев Д.А.
Моделирование процесса распространения аэрозольных частиц в пограничном слое атмосферы с учетом их поглощения и захвата растительным покровом 41

Назирова Э.Ш., Неъматов А., Исмаилов Ш., Артикбаева Г.
Математическое моделирование фильтрации газа с учетом изменения пористости породы в зависимости от давления 58

Равшанов Н., Холматова И.И., Курбонов Н.М., Исламов Ю.Н.
Математическое моделирование процесса подземного выщелачивания с учетом изменения гидродинамических параметров пористой среды 72

Адылова Ф.Т., Давронов Р.Р.
Генеративный искусственный интеллект для разработки лекарств de novo: новые рубежи в области молекул 85

Мадатов Х.А.
Математическая модель автоматического определения несущественных слов текстов на узбекском языке 99

Сулюкова Л.Ф., Ёркулов Б.А.
Методика оценки имеющегося уровня информационной безопасности образовательной информационной системы 106